

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO EM PITES DE
CORROSÃO SECUNDÁRIOS

por

Ettore Pilla

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Maio de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Pilla, Ettore
AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO EM
PITES DE CORROSÃO SECUNDÁRIOS / Ettore Pilla. -- 2021.
23 f.
Orientador: Daniel Milbrath De Leon.

Coorientador: Marcelo Favaro Borges.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Concentrador de Tensões. 2. Pites de Corrosão.
3. Método de Elementos Finitos. I. Milbrath De Leon,
Daniel, orient. II. Favaro Borges, Marcelo, coorient.
III. Título.

Ettore Pilla

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO EM PITES DE
CORROSÃO SECUNDÁRIOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenado do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Daniel Milbrath De Leon
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Daniel Milbrath De Leon

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz
Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, Maio de 2021

AGRADECIMENTOS

Aos meus colegas de LAMEF que me ajudaram ao longo da trajetória do curso. Em especial a Mariana dos Reis Tagliari por todo apoio durante os anos e auxílio na realização do trabalho e a Carolina Delwing Rosa por ajudar na definição do tema do trabalho.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO EM PITES
DE CORROSÃO SECUNDÁRIOS

Ettore Pilla

Ettore.pilla@ufrgs.br

Resumo. Este trabalho compara valores do fator de concentração de tensões (K_t) de pites e pites secundários obtidos via simulação numérica com os existentes na literatura, de forma a avaliar a validade dos modelos utilizados atualmente para os cálculos de K_t ocasionados por pites de diversas morfologias. Para avaliar a validade dos modelos, foram realizadas simulações de pites contendo pites secundários em sua parede em diversas posições e sob carregamento uniaxial, visando uma melhor aproximação com a geometria real. Os valores obtidos se mostraram muito superiores quando comparados aos obtidos com geometrias convencionalmente utilizadas, demonstrando a necessidade de desenvolvimento de novos modelos para a obtenção de valores de K_t .

Palavras-chave: Concentrador de tensão, Pites de corrosão, Método de Elementos Finitos

Numerical evaluation of stress concentration at secondary corrosion pits

Abstract. This paper compares stress concentration factors (K_t) values from corrosion pits and secondary pits obtained by numerical simulation with existing values from scientific literature to evaluate the currently used K_t calculation models validity for corrosion pits of different morphologies. To evaluate the validity of those models, simulations of pits with secondary pits on multiple locations of the pits' wall under uniaxial loading were executed, aiming a better approximation with the real geometry. The values obtained are much higher when compared to values from conventional geometries, demonstrating a need to develop new models for obtaining K_t values.

Keywords: Stress concentration, Corrosion Pitting, Finite Elements Method

NOMENCLATURA

Símbolo		
a	Profundidade do pite	[μm]
2c	Comprimento do pite	[μm]
c	Meio comprimento do pite	[μm]
b	Largura do pite	[μm]
Rd	Razão de aspecto b/c	
Rs	Razão de aspecto a/c	
a/2c	Razão de aspecto do pite	
h	Posição do centro do pite secundário	[μm]
K_t	Fator Concentrador de tensões	
P	Pressão	[MPa]
A	Área	[mm^2]
F	Força	[N]
Símbolos Gregos		
θ	Ângulo entre os eixos do pite e pite secundário	[$^\circ$]
σ_{nom}	Tensão nominal	[MPa]
σ_{max}	Tensão máxima	[MPa]
α	Coefficiente de ajuste	

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
2.1. Objetivos específicos	2
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	2
4. FUNDAMENTAÇÃO.....	3
4.1. Geometria do Defeito.....	4
4.2. Geometria do Modelo	5
5. METODOLOGIA.....	6
5.1. Modelos de Elementos Finitos.....	6
6. RESULTADOS	9
7. CONCLUSÃO.....	13
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	13
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	13
APÊNDICE A	16

1. INTRODUÇÃO

No projeto de estruturas expostas à água salgada e outros ambientes agressivos, normalmente são considerados os efeitos da corrosão generalizada na habilidade da estrutura de resistir aos carregamentos aplicados. De forma geral são consideradas no projeto taxas de perda de espessura de material por corrosão, porém essas taxas consideram apenas fenômenos de corrosão que atingem a estrutura de forma homogênea, o que desconsidera muitas vezes fenômenos de corrosão localizada, os quais frequentemente são muito mais danosos à capacidade de uma estrutura de suportar carregamentos, principalmente se forem cíclicos. Isso ocorre devido a formação de pites, pequenas zonas de corrosão preferencial que agem como descontinuidades geométricas e que concentram tensões.(CERIT, Muhammet, 2019)

Os efeitos das descontinuidades geométricas podem ser quantificados através de um fator de concentração de tensão, denominado como “ Kt ”, que pode ser obtido de diversas formas, seja através de ensaios mecânicos, cálculos analíticos ou simulações numéricas, dependendo da simplicidade e dimensões da descontinuidade.

Essas regiões de maior tensão, resultado da concentração de tensão, são mais propensas à nucleação de trincas de fadiga. Por consequência, podem levar à falha prematura da estrutura. Em casos em que a estrutura está submetida a carregamentos cíclicos, a falha pode ocorrer muito antes do esperado se não considerada a possibilidade da formação deste tipo de concentrador de tensão devido à corrosão localizada durante a fase de projeto ou de avaliação de vida remanescente de uma estrutura.(GONÇALVES, 2018)

Estruturas utilizadas na indústria *offshore* de óleo e gás são sujeitas a diversos fenômenos de corrosão, entre eles a corrosão localizada. Os dutos flexíveis, cuja função é a conexão entre as plataformas e os poços de produção, são especialmente sujeitos à ocorrência de corrosão localizada. Portanto, a determinação do impacto gerado por pites de corrosão na resistência da estrutura é de extrema importância para a garantir a segurança operacional dos dutos (GONÇALVES, 2018; NEGREIROS, 2016).

Como dutos flexíveis estão expostos a diversas condições de operação dependendo de sua localização e função Borges (2017). É necessário considerar os efeitos das diferentes condições de operação, as quais acabam por ocasionar a ação diferentes mecanismos de corrosão. Os diferentes mecanismos de corrosão resultam em diferentes geometrias de corrosão.

As diferentes geometrias de pites são identificadas conforme mapeado pela norma ASTM G46, sendo algumas morfologias mais severas para a resistência da estrutura do que outras. Vários modelos já foram criados visando o cálculo do Kt de pites. Contudo, os modelos existentes partem de uma aproximação que desconsidera a presença de pites secundários e outras imperfeições nas paredes do pite.

Em casos onde foi observada corrosão com pites de tamanho significativo, foi observado a nucleação de trincas de fadiga a partir de pites secundários expressivos, ou seja, com dimensões maiores que a rugosidade interna do pit primário. O número de ciclos até a falha nesses casos foi muito inferior aos números previstos com a aplicação da norma API 579. A partir destas ocorrências, uma investigação abordando pites secundários, com tamanho significativamente superior a rugosidade do material se tornou de interesse.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal observar os efeitos no aumento das tensões causadas por um pite secundário em diversas posições ao longo da parede de um pite principal utilizando simulação numérica por elementos finitos. Serão comparados os valores de Kt obtidos de dois diferentes tamanhos de pites secundários, em 5 posições diferentes no pite principal, assim como o pite principal sem a presença do pite secundário.

2.1. Objetivos específicos

Além de realizar as comparações entre os resultados obtidos durante a realização do trabalho, tem-se como objetivo comparar os resultados obtidos na investigação com resultados existentes na literatura, de forma a avaliar a validade das abordagens já existentes e a necessidade de desenvolvimento de novas abordagens.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O estudo da concentração de tensões causado por pites é abordado por diversos autores. Cerit et al. (2009) aborda pites com diversas razões de aspecto $a/2c$, a relação entre a sua profundidade e comprimento, e utiliza da equação 1) para cálculo do Kt . Esta equação é comumente utilizada para determinação do fator de concentração de tensões Kt gerado por um pite semi-elíptico (G01 COMMITTEE, [s. d.]) com paredes lisas sob carregamento em tração. As posições para medidas de $a/2c$ podem ser observadas na Figura 1. Também é constatado que a presença de um pite secundário provoca aumentos significativos nos valores de Kt , porém somente foi avaliada a existência de um pite secundário no fundo do pite principal. Cerit (2013) dando continuidade ao trabalho anterior, considerou os efeitos sob carregamento torcional em pites não axissimétricos e com diferentes orientações com relação ao carregamento, também abordando mais a fundo os efeitos de diferentes pites secundários localizados no fundo de um pite principal. Os resultados indicaram aumentos ainda mais significativos no Kt quando comparados com um pite com paredes lisas.

$$Kt = \frac{[1 + 6,6(a/2c)]}{[1 + 2(a/2c)]} \quad (1)$$

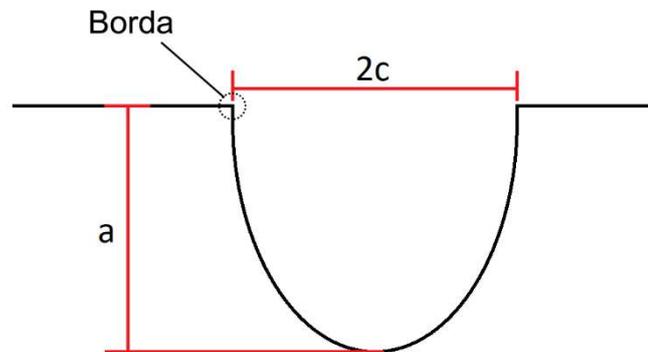


Figura 1- Posições para medir a e $2c$ (Fonte: O Autor)

No trabalho de Pidaparti (2010) foi realizada uma investigação no processo de crescimento de pites e seus perfis, mostrando a existência de um afastamento do formato idealizado de semi-elipse e o surgimento de defeitos na lateais similares a pites secundários.

A distribuição de tensões dentro de um pite foi estudada por Turnbull et al. (2010) onde se demonstra que a zona de maior concentração de tensões não corresponde ao fundo do pite e sim a uma região abaixo de sua borda.

A avaliação da influência da geométrica com uso de uma abordagem foi realizada por Huang et al. (2014). Onde é considerado que um quantidade significativa dos pites observados em experimentos não apresentam um perfil circular quando vistos de topo. Foi proposto que pites devem ser considerados com 3 medidas distintas, profundidade a , largura $2b$ e comprimento $2c$ como pode ser visto na Figura 2, e as razões de aspecto R_s e R_d , as quais

representam, respectivamente, o quociente de largura por comprimento e profundidade pela metade do comprimento. Foi obtida a equação (2) que relaciona as duas razões R_s e R_d com os valores de Kt obtidos nas simulações. O coeficiente α é tabelado e pode ser obtido no trabalho de Huang et al. (2014).

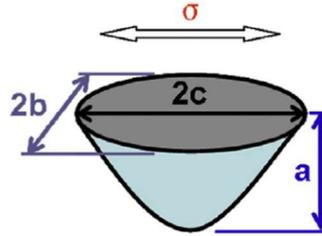


Figura 2 - Disposição das medidas considerando $2b$ (Fonte: Huang et al. 2014)

$$Kt = \begin{cases} \frac{Rd}{0,03 + \alpha \times Rd + 0,1 \times \sqrt{Rd}}, & 0,2 < Rs < 1; \\ \frac{Rd}{0,15 + \alpha \times Rd + 0,03 \times \sqrt{Rd}}, & 1 \leq Rs \leq 2,5; \end{cases} \quad (2)$$

A correlação do Kt com a largura $2c$ e a profundidade a é abordada com maior profundidade por Cerit (2019), sendo considerados de forma mais detalhada os efeitos de pites e pites secundários considerando corrosão interna em um tanque esférico sob pressão. Neste trabalho é demonstrado que o aumento do diâmetro de um pite secundário ocasiona uma redução do Kt quando mantida uma determinada razão de aspecto, ao mesmo tempo que aumentos da razão de aspecto do pite secundário correspondem a valores superiores de Kt para um dado diâmetro.

4. FUNDAMENTAÇÃO

Com a utilização de simulações numéricas é possível a obtenção dos valores das tensões nominais e máximas de um modelo, esses valores por sua vez podem então ser utilizados para a determinação do Kt . O valor do Kt pode ser obtido através da relação entre a tensão máxima causada pelo defeito e a tensão nominal, que ocorreria caso não existisse um defeito, como pode ser visto na equação (3) (BUDYNAS; NISBETT; SHIGLEY, 2015). Considerando a aplicação do carregamento na simulação através de um carregamento de pressão superficial P na face de uma das extremidades, com sentido para o exterior de um corpo qualquer, ao aplicarmos essa pressão na face com área A obtemos uma força F pela equação (5), que resulta em uma tensão nominal σ_{nom} pela equação (4). Tendo que, ao aplicar a equação (5) na equação (4), obtemos (6), e ao considerar uma pressão de $P=1 \times 10^n$, onde n é um número inteiro positivo qualquer, e assumindo que Kt possui uma ordem de grandeza similar a P , concluímos que o valor de tensão máxima obtido em uma simulação corresponde ao Kt de forma direta.

$$Kt = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (3)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A} \quad (4)$$

$$F = P \times A \quad (5)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{P \times A}{A} \rightarrow \sigma_{nom} = P \quad (6)$$

4.1. Geometria do Defeito

Pites podem ocorrer com uma variedade de geometrias. A categorização destas geometrias é apresentada na norma ASTM G46-94 (G01 COMMITTEE, [s. d.]), como pode ser visto na Figura 3. Nos trabalhos observados na literatura se utiliza a aproximação de um pite semielíptico, com as laterais lisas (geometria B da norma) e sem defeitos, como nos trabalhos de diversos autores (CERIT, M.; GENEL; EKSI, 2009; CERIT, Muhammet, 2013, 2019; HUANG *et al.*, 2014). Porém, na realidade, pites dificilmente apresentam superfícies lisas e geralmente possuem pites secundários ou ondulações em seu perfil lateral. Os formatos observados em estudos práticos como o de Negreiros (2016) demonstram a irregularidade da superfície dos defeitos e a presença de pites secundários, como pode ser visto na Figura 4

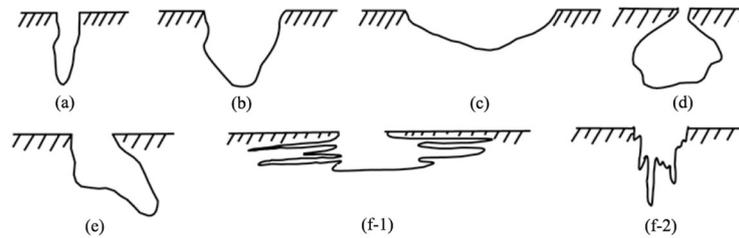


Figura 3 - Classificação de Pites. (a) Estreito, fundo; (b) Elíptico; (c) Largo, raso; (d) Subsuperficial; (e) Sublamelar; (f-1) Microestrutural horizontal ; (f-2) Microestrutural vertical (FONTE: Adaptado de ASTM G46)

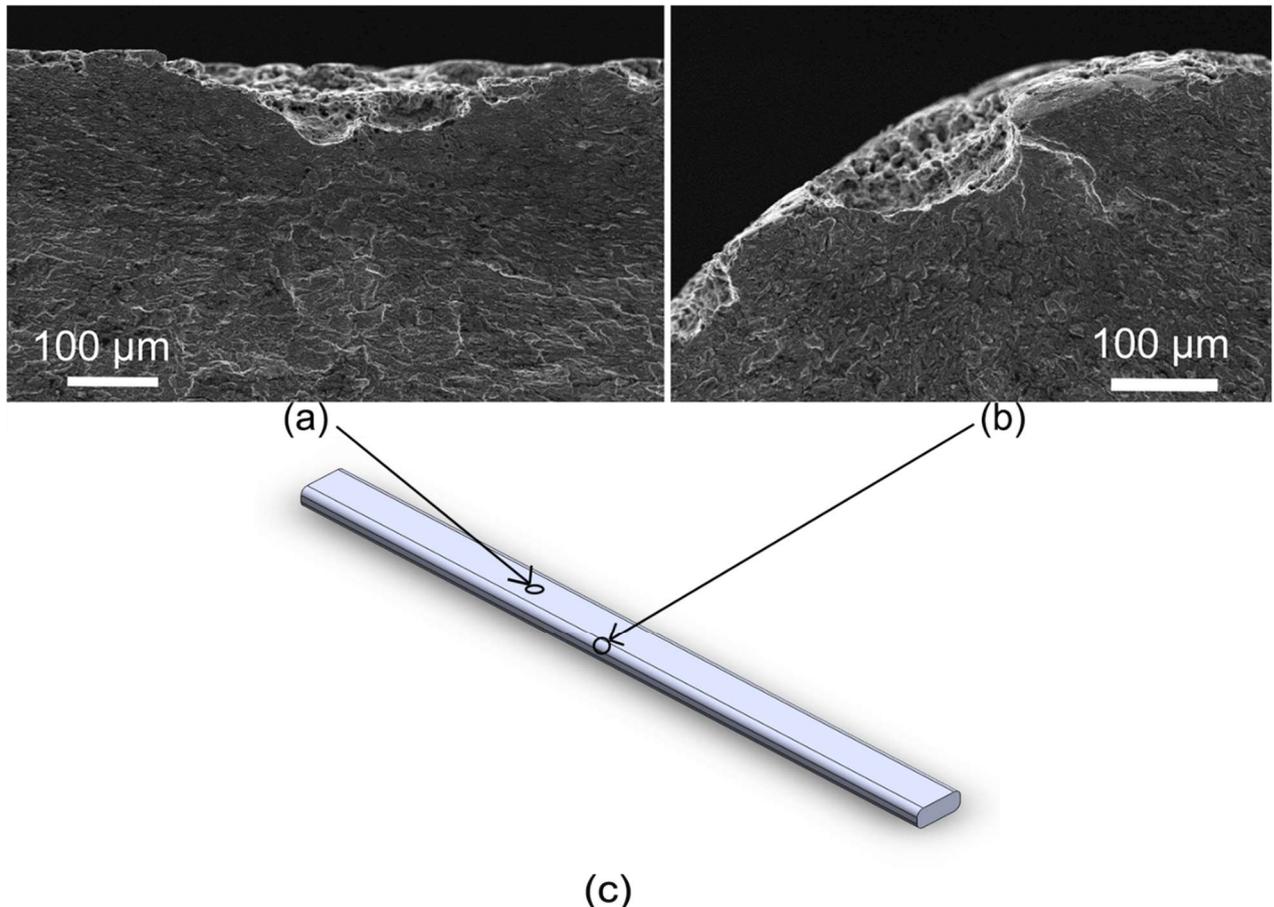


Figura 4 – (a) e (b) Pites resultantes de corrosão em condições reais (FONTE: Adaptado de Negreiros, 2016); (c) Representação da posição onde os pites (a) e (b) foram observados em um arame de tração (FONTE: O Autor)

4.2. Geometria do Modelo

O modelo utilizado foi baseado em uma geometria de arames de armadura de tração de dutos flexíveis avaliado por Borges (2017). A geometria escolhida para as simulações consiste de um arame chato com 15mm de largura e 5mm de espessura utilizado em dutos flexíveis para extração *offshore* de óleo e gás. A aplicação de arames na indústria *offshore* ocasionalmente resulta na exposição de tais arames a condições favoráveis ao surgimento de pites de diversas geometrias como visto em diversos trabalhos (BORGES, 2017; NEGREIROS, 2016).

5. METODOLOGIA

5.1. Modelos de Elementos Finitos

Para a realização das simulações numéricas é necessário um modelo representativo do objeto em estudo. Portanto o primeiramente criado um modelo tridimensional base no programa CAE, ABAQUS 6.12 baseados em uma geometria utilizada em arames armaduras de tração de dutos flexíveis com 15mm de largura, 5mm de espessura e 40mm de comprimento. O comprimento foi selecionado de forma a existir uma distância de 195 vezes o tamanho do defeito entre o pite e a face de aplicação de carga que evitasse efeitos de borda na distribuição das tensões, permitindo uma região de tensão homogênea longe do defeito.

A geometria simétrica apresentada pelo modelo permitiu a utilização de dois planos de simetria, como pode ser visto na Figura 5, de forma a reduzir o número de elementos necessários para a simulação e reduzir o esforço computacional. Na face oposta ao plano de simetria XY foi aplicada uma condição de pressão -1000MPa de forma a resultar em um esforço de tração, pois a condição de carregamento de pressão superficial uniforme utilizada considera valores positivos como vetores em direção a superfície e valores negativos como vetores saindo do material.

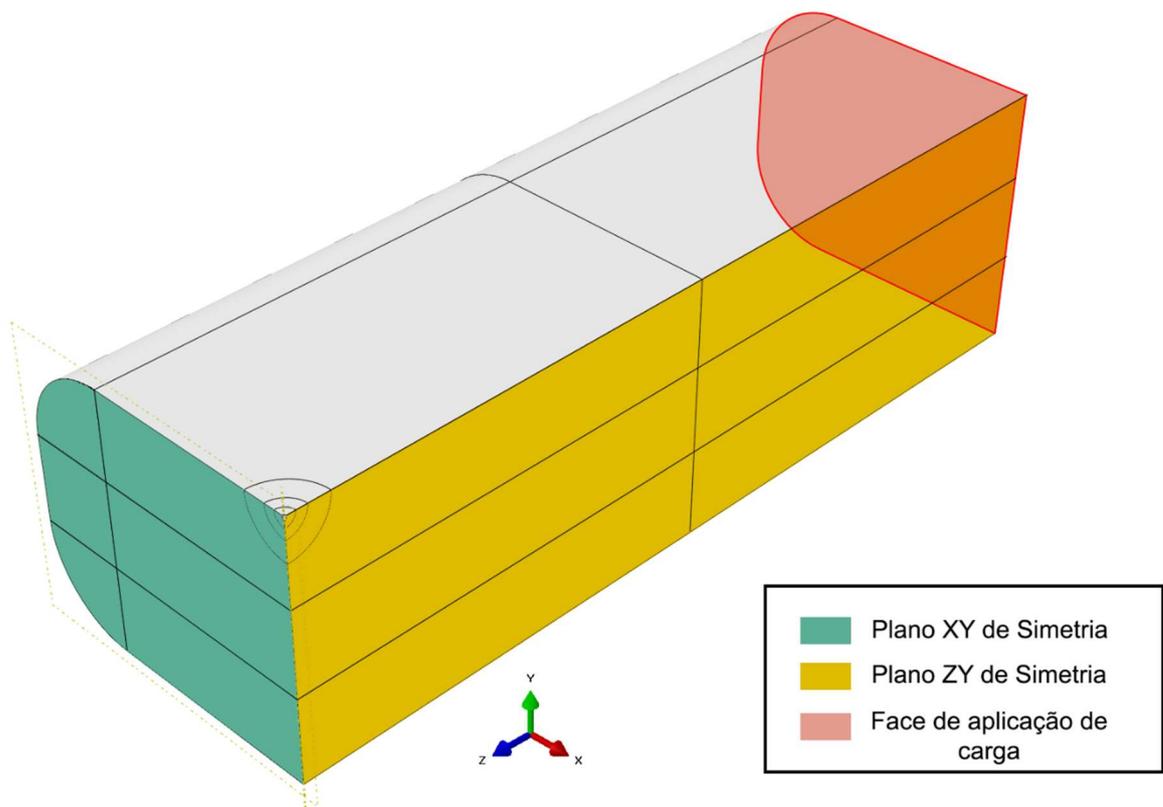


Figura 5 - Planos de simetria (Fonte: O Autor)

Os planos de simetria XY e ZY aplicados na peça correspondem respectivamente as condições de contorno dos tipos ZSYMM e XSYMM no software Abaqus. A condição de ZSYMM limita que a face onde é aplicada se desloque ao longo do eixo Z ou que rotacione ao redor dos eixos X e Y. A condição XSYMM por sua vez impede que a face onde está aplicada se desloque ao longo do eixo X ou rotacione ao redor dos eixos Y e Z.

Considerando que os arames nos quais o modelo é baseado são fabricados a partir de aços de alta resistência mecânica e operam dentro do regime linear elástico do material, foi adotado

um modelo totalmente elástico para o material. Dentro deste modelo elástico o material foi tratado como sendo isotrópico e com o módulo de Young típico para aços de 205GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

O defeito principal, por sua vez, foi modelado com as dimensões de $a=100\mu\text{m}$ e $2c=100\mu\text{m}$, como pode ser visto na Figura 6, de forma a permitir a comparação com os estudos realizados por diversos autores (CERIT, M.; GENEL; EKSI, 2009; CERIT, Muhammet, 2019; HUANG *et al.*, 2014). As dimensões em questão foram escolhidas de forma a viabilizar a simulação dos pites secundários com um número adequado de elementos, sem a necessidade da criação de elementos de tamanho extremamente reduzido, devido ao aumento de dificuldade computacional que ocorre com o uso de elementos muito pequenos e também ao resultante aumento do número de elementos.

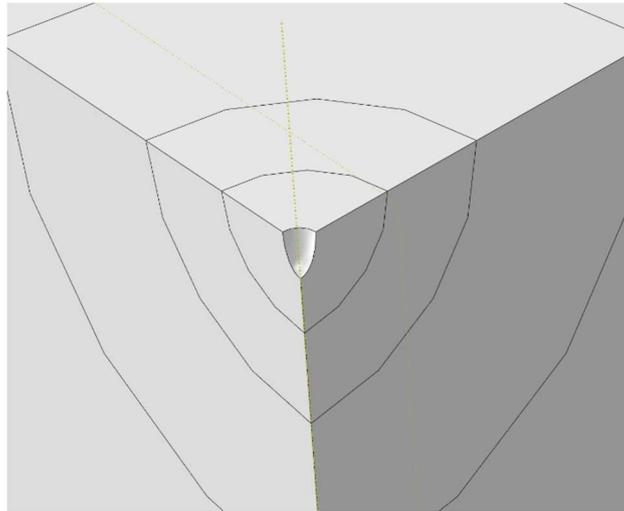


Figura 6 - Pite Principal (Fonte: O Autor)

A malha de elementos finitos foi gerada com a utilização de dois tipos de elementos. Para a maior parcela do modelo, onde as tensões são homogêneas, foram utilizados elementos tetraédricos C3D10I com grande tamanho, por não se tratar da região de interesse. Aproximando-se do defeito foi criada uma sequência de três partições hemisféricas, onde as duas externas apresentam elementos tetraédricos C3D10I como no restante do modelo, porém progressivamente mais refinadas, de forma a gerar uma transição suave de geometria dos elementos. Na região central, onde o pite está localizado, foram utilizados elementos hexaédricos do tipo C3D20R com 20 nós por elemento. O refino progressivo da malha pode ser visto na Figura 7.

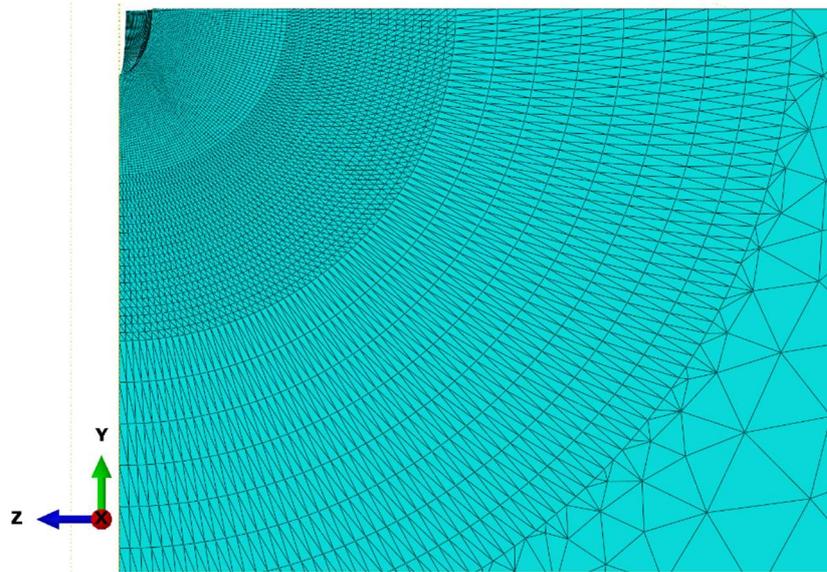


Figura 7- *Transição de tamanho e tipo de elementos* (Fonte: O Autor)

Os parâmetros de geração dos elementos foram determinados através de simulações para convergência de malha, considerando apenas o número de elementos na região de interesse, ou seja, a região imediatamente ao redor do pite principal. Um total de 11 simulações foram necessárias para a estabilização satisfatória dos resultados e determinação dos parâmetros, cujos resultados podem ser vistos na Figura 8. Os parâmetros definidos geraram uma malha contendo aproximadamente 139 mil elementos, sendo o penúltimo ponto da convergência. Contudo, os modelos posteriores contendo pites secundários apresentam um número maior de elementos devido à presença do pite secundário e o número de elementos necessário para representa-lo de forma adequada, com o número de elementos por volta de 203168 mil elementos.

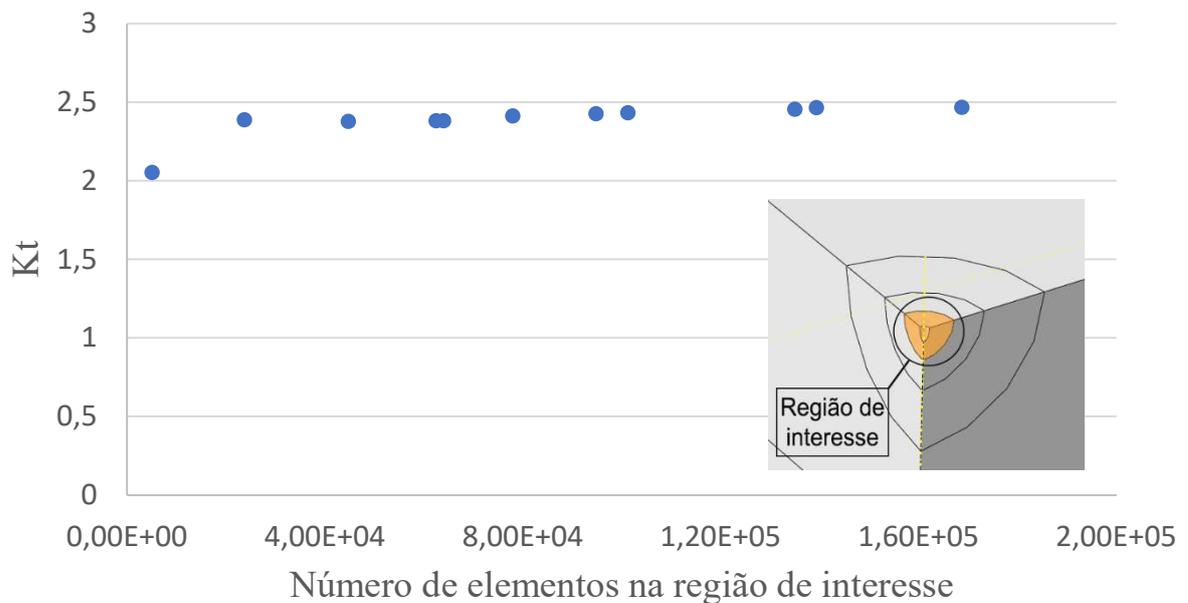


Figura 8 - Gráfico de convergência de malha e indicação da região de interesse onde foram contabilizados os elementos (Fonte: O Autor)

Com os parâmetros definidos para a realização das simulações foram definidos dois tamanhos de pites secundários, primeiramente um pite secundário com 25% do tamanho do primário e outro com 10% do tamanho do primário, de forma a garantir que o defeito analisado possuísse um tamanho significativamente superior a rugosidade do material, a geometria não aguda também evita a formação de um defeito com condições de tensão triaxiais, o qual necessitaria de uma abordagem de mecânica da fratura. Os pites secundários de menor tamanho, 10%, apresentaram, em sua face, aproximadamente 1500 elementos, enquanto os pites secundário do tamanho de 25%, apresentam em sua face, aproximadamente 2800 elementos.

As posições dos pites secundários em relação ao pite principal foram tomadas de forma a mapear de maneira homogênea as posições laterais do pite desde o seu fundo. Estas foram definidas em função da distância h , referente à distância vertical do centro da elipse que representa o pite secundário até o fundo do pite principal como pode ser visto na Figura 9. A partir do modelo gerado com a distância, foi determinado o ângulo entre as linhas centrais dos pites. As configurações utilizadas podem ser vistas na Tabela 1

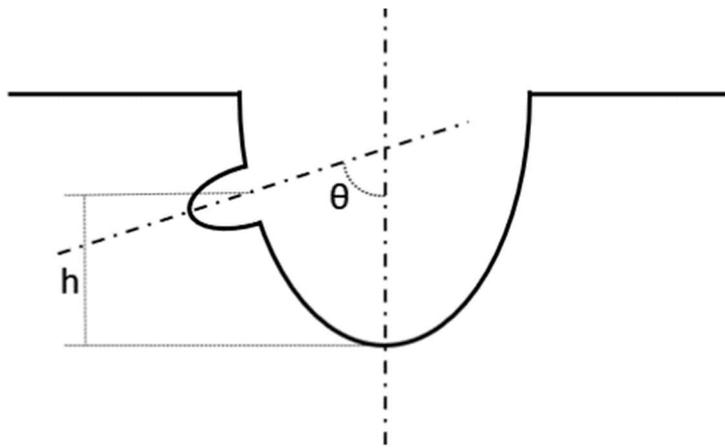


Figura 9 - Diagrama da posição do pite secundário em relação ao pite principal (Fonte: O Autor)

Tabela 1- Configurações de tamanho e posição utilizados

Identificação	NA -00	S10 -00	S10 -10	S10 -25	S10 -50	S10 -60	S10 -75	S25 -00	S25 -10	S25 -25	S25 -50	S25 -60	S25 -75
h [μm]	-	0	10	25	50	60	75	0	10	25	50	60	75
Escala do pite secundário	-	10%						25%					
a [μm] Pite	100												
$2c$ [μm] pite	100												
a [μm] Pite secundário	-	10						25					
$2c$ [μm] Pite secundário	-	10						25					

6. RESULTADOS

Foram observados aumentos significativos dos valores de Kt para ambos os tamanhos de pites secundários quando comparados com o Kt do pite principal. Os aumentos observados

chegam a 212% do valor do pite principal sem pite secundário, esse aumento pode ser visto na Figura 10. O comportamento dos pontos para ambos os tamanhos é similar quando apresentados de forma gráfica com relação ao cosseno do ângulo θ entre os eixos centrais do pite principal e pite secundário. Esse comportamento pode ser observado na Figura 11.

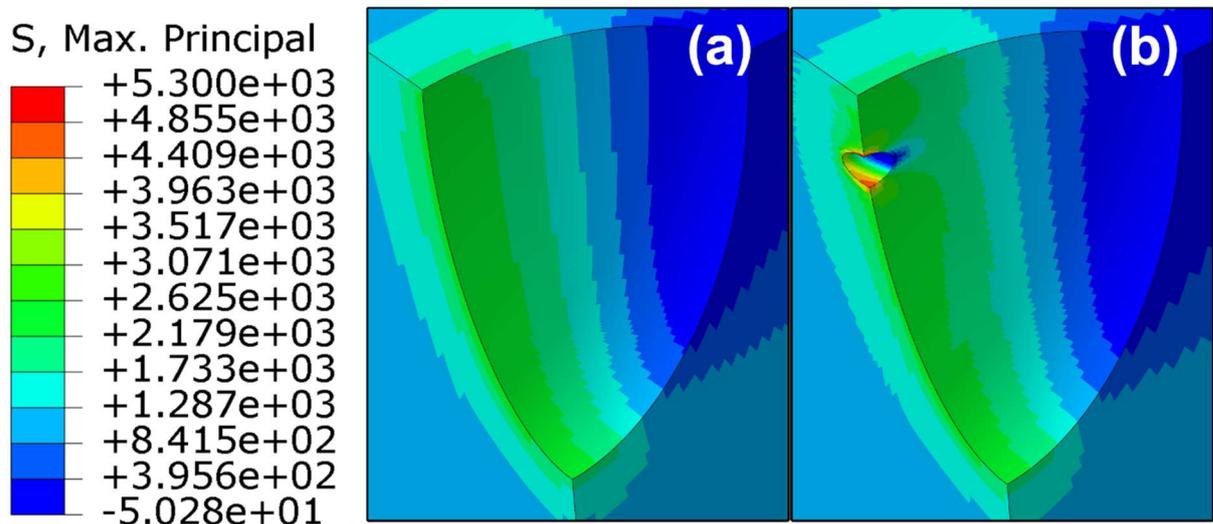


Figura 10 - Resultado da simulação apresentando as tensões máximas principais da configuração base e da configuração S10-75. (a) Pite base NA-00; (b) Pite com pite secundário de maior tensão configuração S10-75 (Fonte: O Autor)

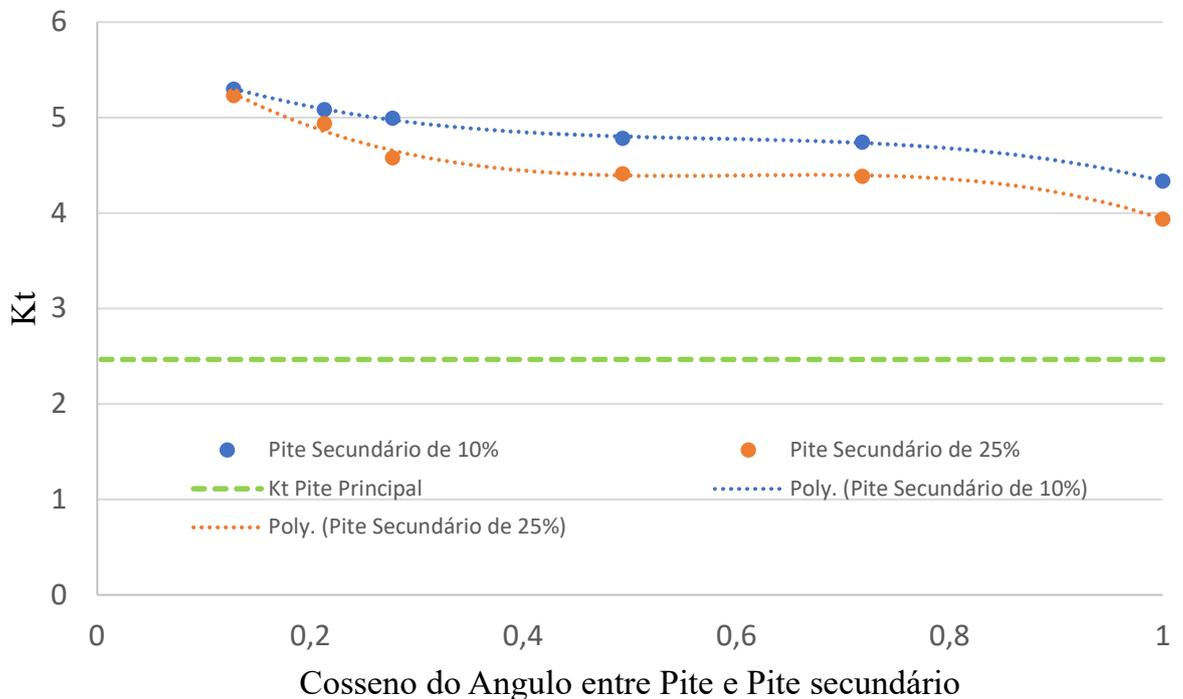


Figura 11 - Gráfico $Kt \times \cos(\theta)$ (Fonte: O Autor)

Observa-se que o ponto de maior tensão ocasionado pelo pite secundário ocorre próximo a sua borda, e a presença do pite secundário ocasiona um grande aumento nas tensões trativas, além de um aumento das tensões compressivas. A convergência dos valores de Kt de ambas as geometrias de pites secundários a medida que o ângulo θ se aproxima de 90° indica uma não

dependência entre dimensão do pite secundário e o Kt resultante, sendo esse efeito possivelmente ocasionado pelo acúmulo das linhas de tensão em uma região pequena entre o pite secundário e a superfície do material.

O aumento da tensão máxima com o deslocamento do pite secundário em direção à borda do pite principal pode ser visualizado de forma clara na Figura 12. É possível também observar o aumento da região com tensões elevadas nas paredes do pite secundário em conjunto com o aumento da tensão máxima, sendo possível observar que na Figura 12 (a) a região do fundo do pite secundário apresenta aproximadamente a mesma tensão que as paredes do pite principal. Na Figura 12 (d) já é visível o aumento da tensão formando uma região contínua de tensão significativamente elevada ligando os dois extremos do pite secundário.

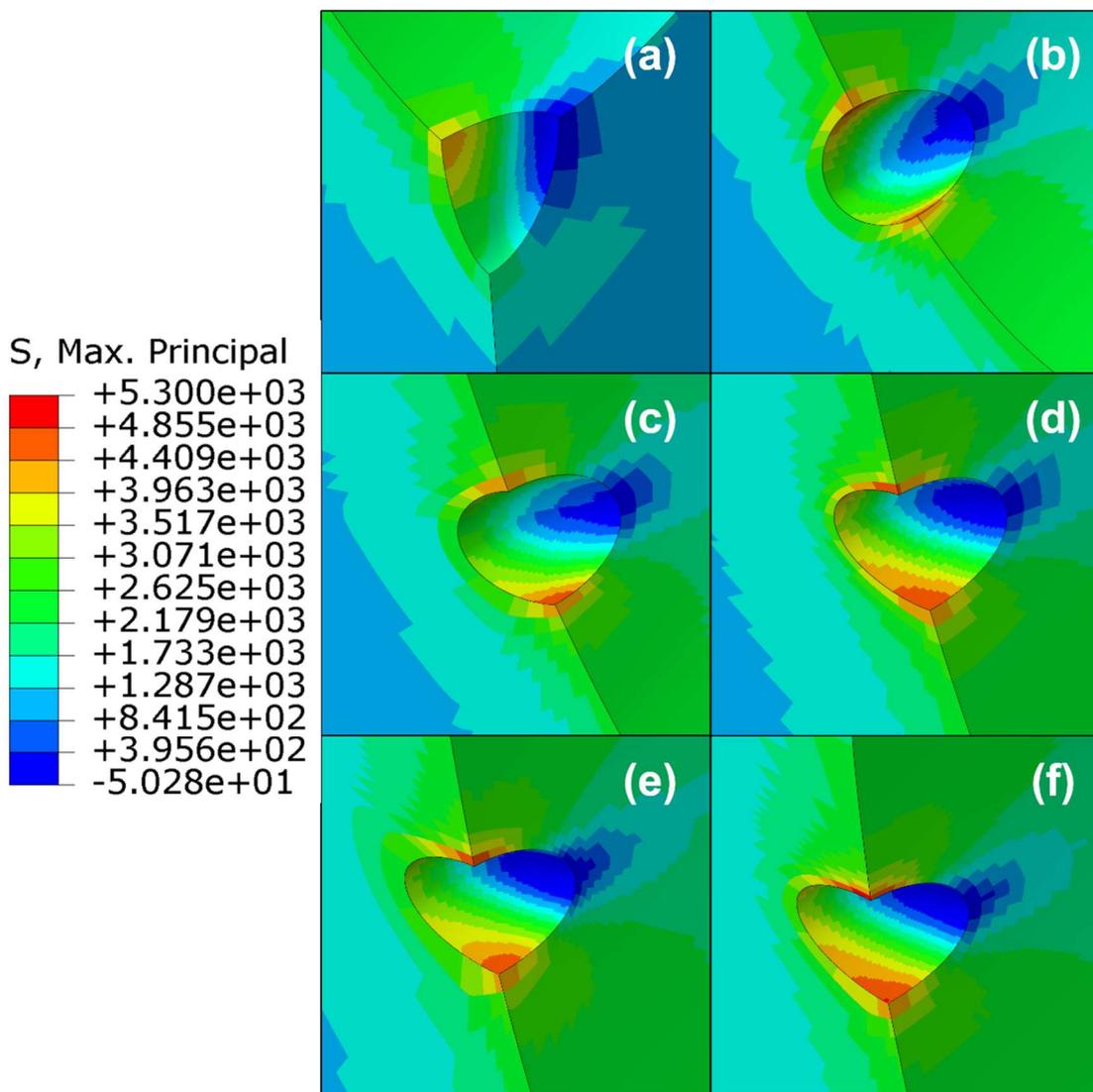


Figura 12 - Visualização da tensão máxima para *cada posição* de pite secundário de 10%. (a) $h=0\mu\text{m}$; (b) $h=10\mu\text{m}$; (c) $h=25\mu\text{m}$; (d) $h=50\mu\text{m}$; (e) $h=60\mu\text{m}$; (f) $h=75\mu\text{m}$ (Fonte: O Autor)

Comparando a distribuição das tensões das geometrias S10-75 e S25-75, Figura 13 (a) e (b) respectivamente, podemos notar que a zona de maior tensão em ambas as geometrias se encontra na borda mais próxima da face superior possivelmente devido ao acúmulo de linhas de tensão, como mencionado anteriormente. Este acúmulo maior ocorreria devido a existência de uma menor área resistente acima do pite secundário, entre o pite secundário e a superfície

do material, em comparação a região abaixo do pite secundário. Outra tendência que pode ser observada é o crescimento da região de aumento significativo de tensão quando comparamos o pite secundário menor com o maior. Essa região é identificada no espectro entre amarelo e vermelho, representando aumentos de 3,5 até 5,3 vezes na tensão quando comparada com a tensão nominal. Enquanto isso, a região em verde representa um aumento de por volta de 2,5x, valor que coincide com o obtido somente com o pite principal.

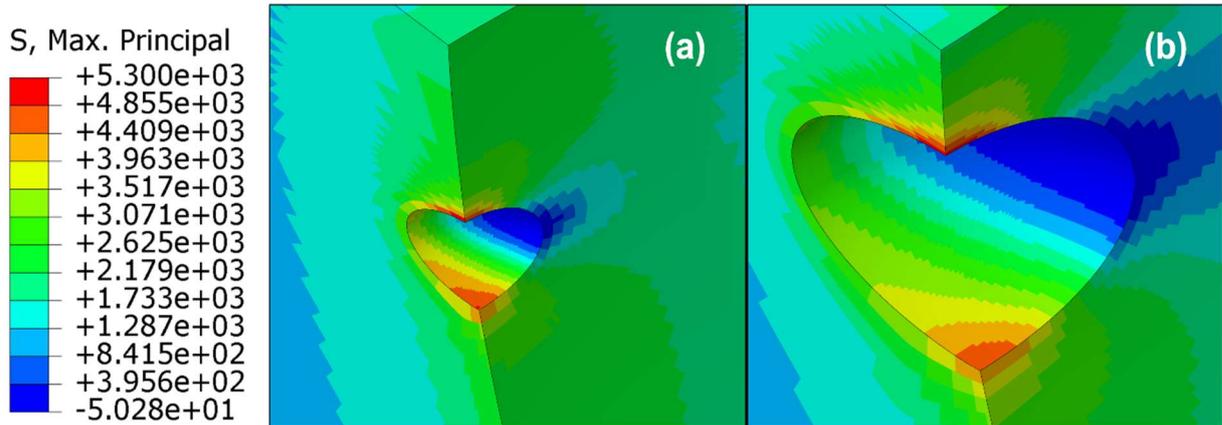


Figura 13 - Comparativo da distribuição de tensões entre as duas geometrias *críticas*. (a) Geometria S10-75; (b) Geometria S25-75 (Fonte: O Autor)

O comportamento esperado das tensões causadas por pites secundários seria uma redução do tamanho do pite secundário ocasionar um aumento da tensão máxima, como demonstrado por Cerit et al. (2009) na Figura 14 (a) e por Cerit (2019) na Figura 14 (b). Entretanto vemos que os valores de Kt obtidos neste trabalho, como visto anteriormente na Figura 13, são superiores com o posicionamento de um pite secundário na lateral do principal, quando comparado com os valores obtidos com pites secundários menores no fundo, como visto na Figura 14. O aumento dos valores de Kt obtidos com o uso de pites secundários nas laterais é ainda mais expressivo quando comparados com os valores calculados a partir das equações (1) e (2), que correspondem a 2,533 e 2,544 respectivamente.

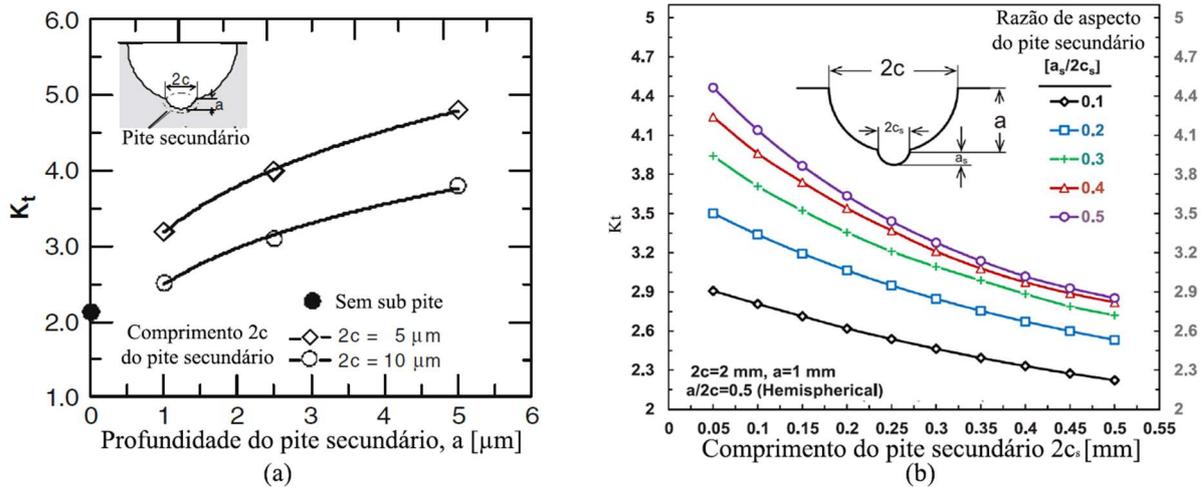


Figura 14 - (a) Efeitos de pequenos *pites secundários* no fundo de *pites* principais (Fonte: adaptado de Cerit, M.; Genel; Eksi, 2009) ; (b) Variação do valor de K_t com a variação de $2c$ do *pite secundário* e razão de aspecto do *pite secundário* (Fonte: adaptado de Cerit, M., 2019)

7. CONCLUSÃO

Considerando que *pites*, pela natureza do seu processo de formação, possuem superfícies altamente rugosas como pôde ser observado na Figura 4, a aplicação de modelos que aproximam *pites* como superfícies perfeitamente lisas não condiz com uma abordagem conservadora necessária para a determinação de vida útil de estruturas críticas como é o caso de dutos flexíveis.

Além disso, a não dependência entre K_t e a dimensão do *pite secundário* quando próximo da borda do *pite* principal demonstrada anteriormente, indica que não só a presença de *pites* secundários mas também a rugosidade da superfície da parede de um *pite* pode resultar em efeitos mais severos de concentração de tensão do que os esperados pelos modelos convencionais.

Portanto, esse estudo conclui que esses parâmetros têm que ser considerados quando do estudo de aumento de tensões causados por essas falhas. A posição do *pite secundário* não pode ser ignorada na análise pois pode constituir fator de aumento do K_t até mais expressivo do que o tamanho do *pite secundário* em si. Esse ponto muitas vezes é ignorado nos trabalhos sobre o assunto.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, são sugeridos estudos que visem validar de forma experimental a concentração de tensões causada por defeitos do tipo *pite*, com e sem a presença de *pites* secundários, e também a avaliação da rugosidade do *pite* como parâmetro de determinação de sua severidade. Para isso, é sugerida a utilização de ensaios em escala aumentada, com uso de técnicas óticas de análise de tensões. Também são sugeridos estudos baseados em simulação de elementos finitos, de defeitos que reproduzam condições reais, com o uso de técnicas de obtenção de modelos tridimensionais de *pites* reais.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

API, **API 579 Recommended Practice for Fitness-For-Service**, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2000. API, API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 2007.

BORGES, M. F. **Correlação numérica-experimental da redução da vida em fadiga de dutos flexíveis operando com anular alagado na presença de CO₂**. 235 f. 2017. Tese - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/172110>

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K.; SHIGLEY, J. E. **Shigley's mechanical engineering design**. Tenth editioned. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015. (Mcgraw-Hill series in mechanical engineering).

CERIT, M.; GENEL, K.; EKSI, S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit. **Engineering Failure Analysis**, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 2467–2472, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.004>

CERIT, Muhammet. Corrosion pit-induced stress concentration in spherical pressure vessel. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], v. 136, p. 106–112, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.014>

CERIT, Muhammet. Numerical investigation on torsional stress concentration factor at the semi elliptical corrosion pit. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 67, p. 225–232, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.10.028>

G01 COMMITTEE. **ASTM G46-94(2018)**. [S. l.]: ASTM International, [s. d.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/G0046-94R18>. Acesso em: 21 abr. 2021.

GONÇALVES, R. **Metodologia de análise da vida em fadiga da armadura de tração de dutos flexíveis submetidos a meios agressivos. um estudo comparativo**. 2018. Dissertation - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/193162>

HUANG, Y. *et al.* Quantitative correlation between geometric parameters and stress concentration of corrosion pits. **Engineering Failure Analysis**, [s. l.], v. 44, p. 168–178, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.020>

NEGREIROS, L. A. S. DE. **Avaliação da resistência à fadiga e corrosão-fadiga da armadura de tração de um riser flexível retirado de operação**. 197 f. 2016. Dissertation - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/150496>

PIDAPARTI, R. M.; PATEL, R. K. Investigation of a single pit/defect evolution during the corrosion process. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 52, n. 9, p. 3150–3153, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.05.029>

TURNBULL, A.; WRIGHT, L.; CROCKER, L. New insight into the pit-to-crack transition from finite element analysis of the stress and strain distribution around a corrosion pit. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 1492–1498, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.12.004>

APÊNDICE A

Essa seção apresenta imagens dos resultados das simulações de forma a permitir uma melhor visualização dos detalhes.

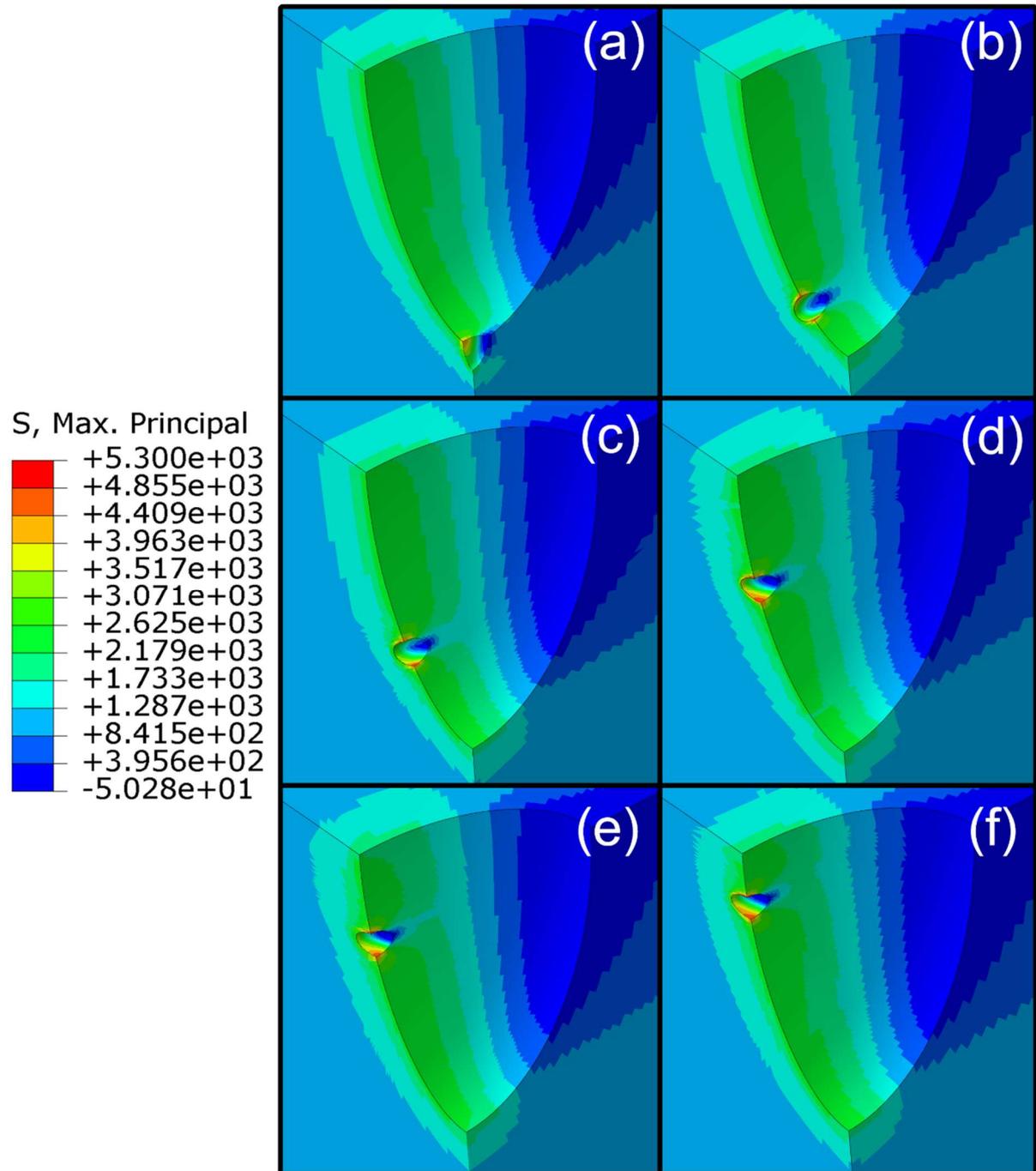


Figura A - 1 Resultados pite 10%. (a) $h=0\mu\text{m}$; (b) $h=10\mu\text{m}$; (c) $h=25\mu\text{m}$; (d) $h=50\mu\text{m}$; (e) $h=60\mu\text{m}$; (f) $h=75\mu\text{m}$

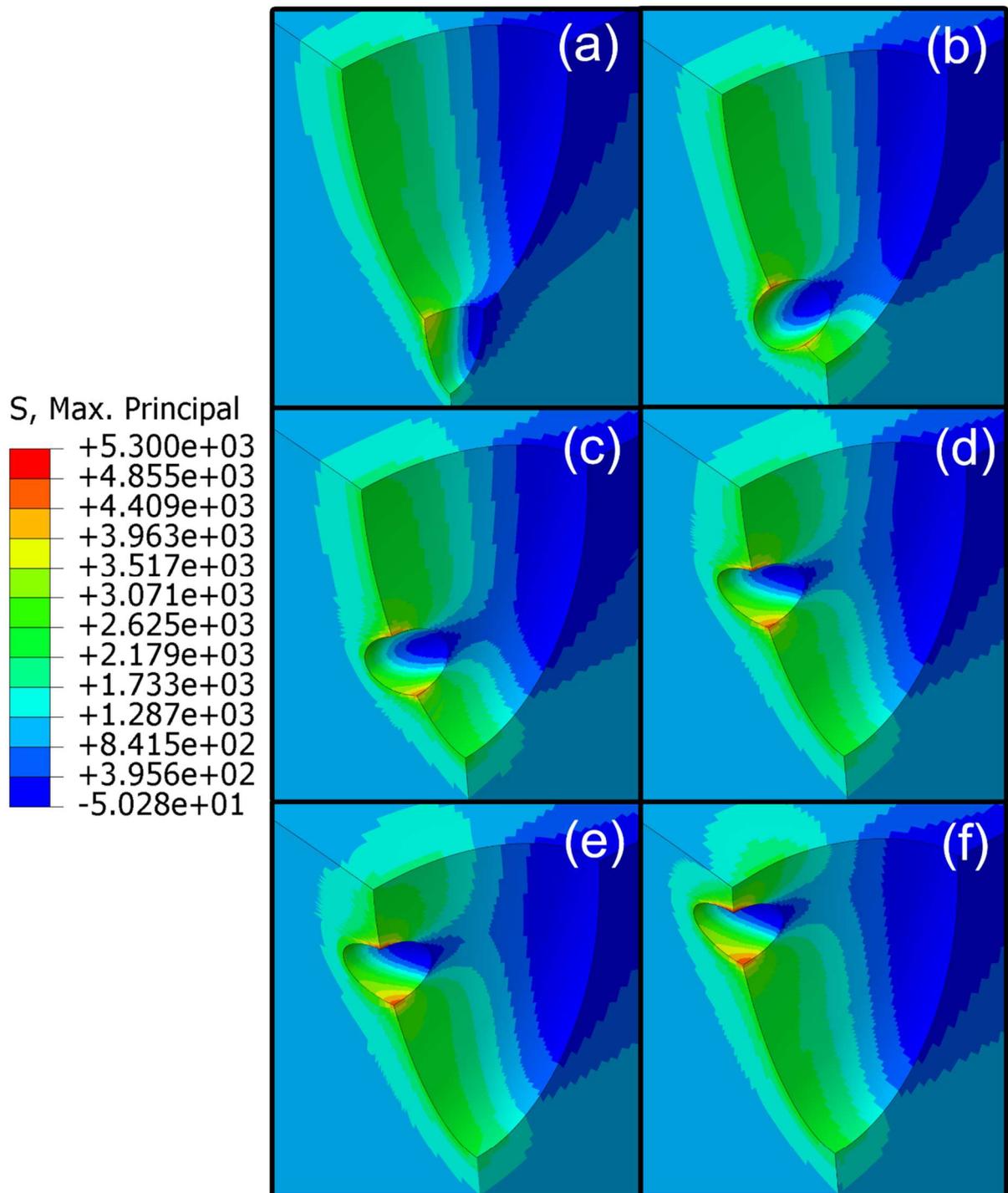


Figura A - 2 - Resultados pite 25%. (a) $h=0\mu\text{m}$; (b) $h=10\mu\text{m}$; (c) $h=25\mu\text{m}$; (d) $h=50\mu\text{m}$; (e) $h=60\mu\text{m}$; (f) $h=75\mu\text{m}$